

屋上緑化による建築物に対する熱負荷の 軽減効果についての実証的研究

峰村太輔¹・山田宏之²・山本幹雄³・中尾史郎⁴・中島敦司⁵・養父志乃夫⁶

¹非会員 和歌山大学大学院博士前期課程 システム工学研究科 (〒640-8510 和歌山市栄谷 930 番地)

²非会員 博(学) 和歌山大学助教授 システム工学部 (同上)

³非会員 都市基盤整備公団 技術管理部 (〒102-8201 東京都千代田区九段北 1-14-6)

⁴正会員 博(農) 和歌山大学助手 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷 930 番地)

⁵正会員 博(学) 和歌山大学助教授 システム工学部 (同上)

⁶正会員 農博 和歌山大学教授 システム工学部 (同上)

屋上緑化による建築物への熱環境の改善効果の定量化を目的に、表面温度、地温、熱流の測定を実施した。その結果、断熱層上面地温とスラブコンクリート下面表面温度の温度差と断熱層の熱流との間に高い相関がみられ、簡単な時間補正のみで、精度良く熱流を推定できることが分かった。そこで、1997年から2001年までの温度データを用いて熱流の推定を行った。夏期の7、8月の期間について4年間を平均してみると、緑化区の屋上面から下向きの最大熱流は非緑化区の最大熱流の7.3%に抑制されていた。また、冬期の1、2月の期間について4年間を平均してスラブコンクリート面から屋上面へ向かう上向きの最大熱流を比較したところ、緑化区の最大熱流は非緑化区の最大熱流の59.0%に抑制されているという結果になった。

Key Words : *roof top plantings, surface temperature, soil temperature, heat flux, annual heat absorption*

1. はじめに

現在、環境への負荷の軽減、人と自然との共生、アメニティの創出を図った環境共生都市の整備が積極的に進められている。なかでも、都市環境を向上させるための有効な手段の1つとして都市の緑化が挙げられ、その緑化技術の1つとして屋上緑化は最近最も注目を集めてきている。屋上緑化には、都市部で大きな問題となっているヒートアイランド現象の軽減効果、大気浄化効果、都市の自然性を高める効果、アメニティ効果といった都市環境改善効果の他、建築物の保護効果、省エネ効果といった経済的な効果が期待されている¹⁾。また、こういった期待を受けて、2001年4月東京都において「東京における自然保護と回復に関する条例」の改正に伴う建築物緑化の義務化、国土交通省においても2001年8月24日に都市緑地保全法の一部改正で、緑化施設整備計画認定制度が創設され、緑化の代償としての建

築規制の緩和や税制の優遇処置、助成金等、行政側からの後押しも加速してきた。

都市環境改善技術の1つとしての屋上緑化の評価に関しては、原菌らにより²⁾、屋上の仮設植栽を対象として、屋上面から建物内への貫流熱流量を温度測定データより推計し、緑化による建物への熱負荷の低減が報告されている。また、野島らにより³⁾、実存する屋上緑化事例を対象として、実測熱流量より屋上緑化による建築物の熱環境の改善効果に関する報告がなされている。しかし、これらはいずれも夏季における晴天日の1日の変化を述べたものである。

そこで本研究では、年間を通して屋上緑化が建築物の熱環境に及ぼす影響について、既存の屋上緑化建築物を用いて検討を行った。

本実験は、都市基盤整備公団の総合研究所技術センター内の建物屋上に屋上緑化実験区が設置されており、当実験区において緑化実験区設置時の1997

年5月から2001年8月まで建築物各部位の温度変化の観察を行うことを目的とした温度測定を実施した。この温度測定結果を用いて、建築物に対する熱負荷を検討すべく、推定により屋上面から建物内への貫流熱流量を求めることを試みた。そこで、熱流測定と温度測定を2001年の夏期に新たに行った。そして、これらの温度および熱流の解析結果より、当実験区において1997年から長期間測定を行った温度測定結果を用いて、屋上面からの熱流の算定を行い、算定熱流より年間を通して屋上緑化が建築物に及ぼす熱負荷の軽減効果について検討を行ったものである。

2. 研究の方法

(1) 実験区の概要

測定は、東京都八王子市にある都市基盤整備公団総合研究所技術センター“すまいと環境館”屋上(2階建て)に設置されている約200㎡の屋上緑化実験区を用いて行った。植栽基盤は黒土にパーライトを20%混合した土壌150mmと排水層で構成されている⁴⁾。ここには、コウライシバの他、薄層土壌による屋上緑化に適した草本、低木等約80種の植物が植栽されている。今回測定するにあたり、コウライシバで緑化された地点(以下、緑化区とする)と比較対照のため緑化が行われていない地点(以下、非緑化区とする)に計測器をそれぞれ設置した(図-1)。当実験区における維持管理については、灌水、除草、肥料等は全く行われず、完全な無管理状態となっている。

(2) 測定方法

a) 温度測定

当実験区において、屋上緑化の施工を行った1997年5月から2001年8月まで緑化区および非緑化区における各層の地温、緑化区におけるスラブコンクリート下面の表面温度の測定をそれぞれ30分間隔で行った(図-2)。測定にはシーエス熱電対(樹仁・エ・ディ製)を用いた。

これに加えて、今回新たに緑化区および非緑化区においてスラブコンクリート下面、天井上面に温度計を設置し(図-2)、2001年7月25日から8月8日まで10分間隔で表面温度の測定を行った。(樹佐藤計量器製作所製。SK-L200Tを使用)

b) 熱流測定、日射量測定

熱流および日射量についても、2001年7月25日から8月8日まで10分間隔で測定を行った。

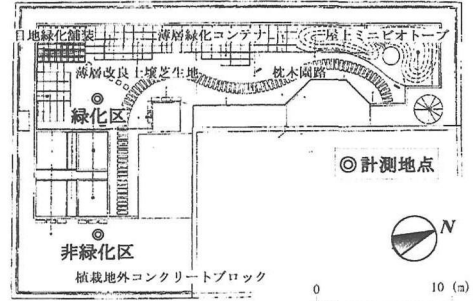
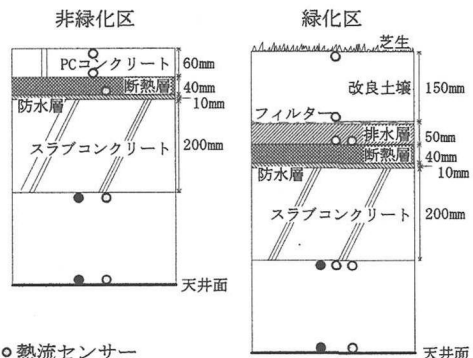


図-1 屋上平面図



- 熱流センサー
- 温度センサー (2001年に新たに設置)
- 温度センサー (1997年に設置)

図-2 温度および熱流センサーの配置図

熱流については、緑化区の断熱層上面、スラブコンクリート下面、天井上面、非緑化区の断熱層下面、スラブコンクリート下面、天井上面にそれぞれ熱流センサー(HU-KSEFLUX製。HFP01を使用)を設置して測定を行った(図-2)。また、日射量については、屋上面非緑化区に日射計(英弘精機製。MS-601を使用)を設置して測定を行った。

3. 結果および考察

(1) スラブコンクリート下面の表面温度

2001年7月25日から8月8日までの緑化区、非緑化区におけるスラブコンクリート下面の表面温度の経時変化を図-3に示す。

7月25日から8月6日までは非緑化区の方が高い温度を示したが、それ以降は逆転した。15日間の最大の温度差は1.9℃、平均値では非緑化区の方が緑化区より0.5℃高い結果となった。急激な温度低

下が6箇所で見られるが、これは冷房機の使用によるものである。日較差は緑化区の方が小さく、熱容量の大きい植栽基盤の影響によるものと考えられる。

今回、両者あまり顕著な差が見られなかったのは、建物の構造上、天井裏がひと続きになっているため、緑化区と非緑化区の間で空気の移動が容易に起こること、緑化区と非緑化区は同一スラブ上にあり、その距離も比較的近いため、スラブ横方向の熱の伝導の影響も受けていること、そして、スラブコンクリートが200mmと厚いため、全体の熱容量が大きく、表面温度の変化を受けにくいことなどが原因として考えられる。

(2) 実測熱流値

緑化区の断熱層上面、非緑化区の断熱層下面、および、両区のスラブコンクリート下面、天井上面にそれぞれ設置した熱流の測定結果の一例として7月31日の経時変化を図-4に示す。なお、図-4においてプラス側を屋上面から建物内への吸熱とする。

緑化区の土壤層を流れる熱量と非緑化区の断熱層を流れる熱量を比較すると、非緑化区の最大値で24.7W/m²、緑化区では2.6W/m²の熱流が屋上面から下向きに見られ、ピークカットの効果は9.5倍という結果になった。これは晴天日であれば、おおむね同様の傾向であった。スラブコンクリート下面、天井上面の熱流は、13時から17時の間に著しい変化を示したが、これは冷房機の使用による影響である。スラブコンクリート下面では、この冷房使用時間中に熱流の最大値が出現し、非緑化区で12.7W/m²、緑化区で4.2W/m²となった。天井上面では、非緑化区と緑化区とで熱流が逆転してしまっているが、これは天井裏空間の冷房ダクトの影響が強く現れた結果と考えられる。

いずれにしてもスラブコンクリート下面、天井上面の熱流は、室内空調の影響を強く受けてしまうことが問題であり、熱流測定についてもスラブコンクリート下面、天井上面では、片面が空気層に接しているため熱流計自体の熱容量や水平方向の熱流発生に起因して熱流出力にかなりの誤差が含まれていると思われる。更に、既存の温度データには、天井空間、室内空間の温度データが無く、熱流の推定が不可能なため、これ以降の解析については、緑化区の断熱層上面と非緑化区の断熱層下面の熱流のみを取り上げて解析を行う。ここで、断熱層の熱流計の測定誤差については、熱流計の設置に際して、熱流板の両面を層に密着させて十分に馴染ませていること、本研究対象は約200m²の面積を有する大規模な実験施設であり、スラブコンクリート、土壤層共に熱容

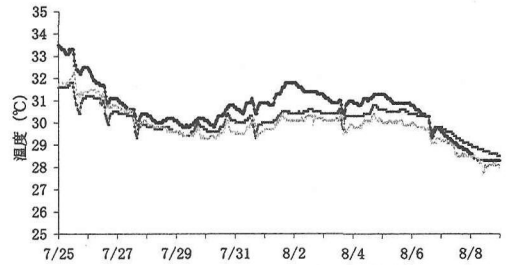


図-3 スラブ下面表面温度の経時変化
—非緑化スラブ -緑化スラブ ···緑化スラブ (1997年設置)

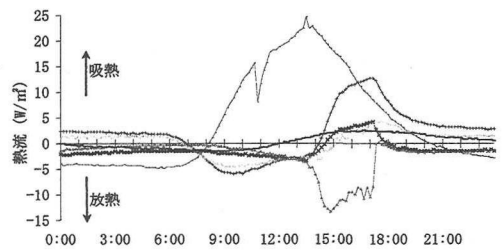


図-4 各層における実測熱流の経時変化
—緑化(断熱層上面) -緑化(スラブ下面) ···緑化(天井上面)
—非緑化(断熱層下面) -非緑化(スラブ下面) ···非緑化(天井上面)

量が大きく、一様な構造であることから、熱流計自体の熱容量は土壤、スラブコンクリートと比較しても小さく無視できるものとする。また、水平方向の熱流発生についても、本実験施設では以上の構造から一様とみなせ、無視できるものとする。

(3) 屋上面から建築物内部への熱流の算定

a) 断熱層上面地温とスラブコンクリート下面表面温度の温度差と断熱層の熱流との関係の比較

定常状態においては、熱流量と温度差の関係は基本的には Fick 式に従うものと考えられ^{5) 6)}、熱流量と温度差とは比例関係にある。そこで、実測温度差と実測熱流の関係を見ることにした。熱流については緑化区では断熱層上面、非緑化区では断熱層下面の値を用いており、温度差については緑化区、非緑化区ともに断熱層上面温度とスラブコンクリート下面表面温度というように3層間の温度差をとった。

まず、2001年に設置し測定を行った7、8月の温度、熱流結果を用いて、緑化区および非緑化区における断熱層上面地温とスラブコンクリート下面表面温度の温度差と断熱層の熱流をそれぞれグラフ化した(図-5)。なお、プラス側を屋上面から建物内への吸熱とする。

2001年7月25日から8月8日までの計測期間の温度差と熱流のピーク出現時刻を比べると、緑化区において平均で1時間42分だけ熱流のピーク出現時刻が早く現れるという結果が得られた。これは、各層の熱伝導に熱コンダクタンスと熱容量が関係しているため、ピーク出現時刻に時間差を生じさせているためと考えられる。また、非緑化区においては平均で6分の時間差がみられたが、今回用いた温度差結果は30分おきの測定であるため、温度差のピーク出現時刻の遅れは無視できるものと考えられる。これらの結果から、緑化区において1時間30分の時間補正を行えば、温度差と熱流のピーク出現時刻を一致させることができることが分かった。ここで、ピーク出現時刻に影響を及ぼすと考えられる土壌の乾湿や気象条件について見ておくと、温度および熱流の測定期間中の初日に100mm前後の局地的な雨が降り、翌日から1週間は晴天が続き、その後は晴天日と曇天日が交互にあった。補正時間については、この測定期間中の各日に現れたピーク出現時刻の時間差を平均したものであり、図-5からも見てとれるように、測定期間中の天候の違いを考慮しても、1時間42分という平均値と各日の温度差のピーク出現時刻の遅れの差は小さいことから、一様に時間補正を行っても誤差は小さいものとする。これより、時間補正を行った温度差を用いて定常状態を仮定した場合の熱流算定を検討した。

b) 温度差と熱流の関係

時間補正した温度差(x)と熱流(y)の回帰分析を行うと、緑化区で $y=0.6102x-0.1097$ 、 $r=0.876$ 、非緑化区で $y=0.7089x+0.0072$ 、 $r=0.985$ となり、ともに温度差と熱流の両者間に高い相関が見られた。このことから、一様に時間補正を行った温度差から熱流を算定することは十分に可能であることが分かった。

c) 既存温度データからの熱流の算定

2001年7月に設置した温度計は緑化区、非緑化区それぞれのスラブコンクリート下面の表面温度を測定したが、1997年から行われた温度測定は緑化区のみである。そこで、測点での経時変化をみると(図-3)、前述したように3者に大きな差は見られないので、これ以降は1997年から測定を行っている温度データを用いて年間の熱流の変化を算定することを検討した。

まず、非緑化区のスラブコンクリート下面の温度を1997年から測定を行っている緑化区のスラブコンクリート下面の温度と置き換え温度差を求めた。そして、上記と同様に7月25日から8月8日までの温度差と熱流との相関をとると、緑化区で $r=0.902$

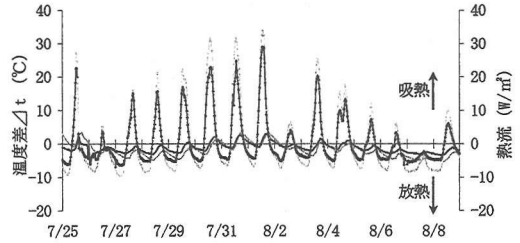


図-5 緑化区および非緑化区における断熱層上面地温とスラブ下面表面温度の温度差と断熱層の熱流の経時変化
—温度差(緑化) —熱流(緑化) - -温度差(非緑化) - -熱流(非緑化)

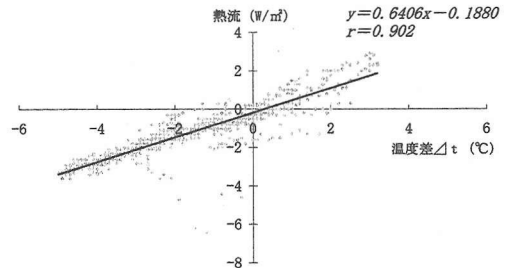


図-6 緑化区における断熱層上面地温とスラブ下面表面温度の温度差と断熱層の熱流との比較

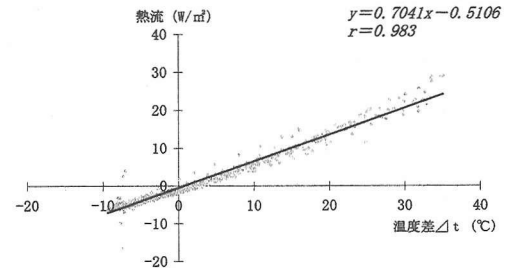


図-7 非緑化区における断熱層上面地温とスラブ下面表面温度の温度差と断熱層の熱流との比較

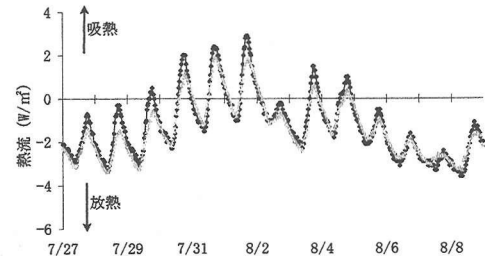


図-8 緑化区における実測熱流と算定熱流の比較
—実測熱流 - -算定熱流

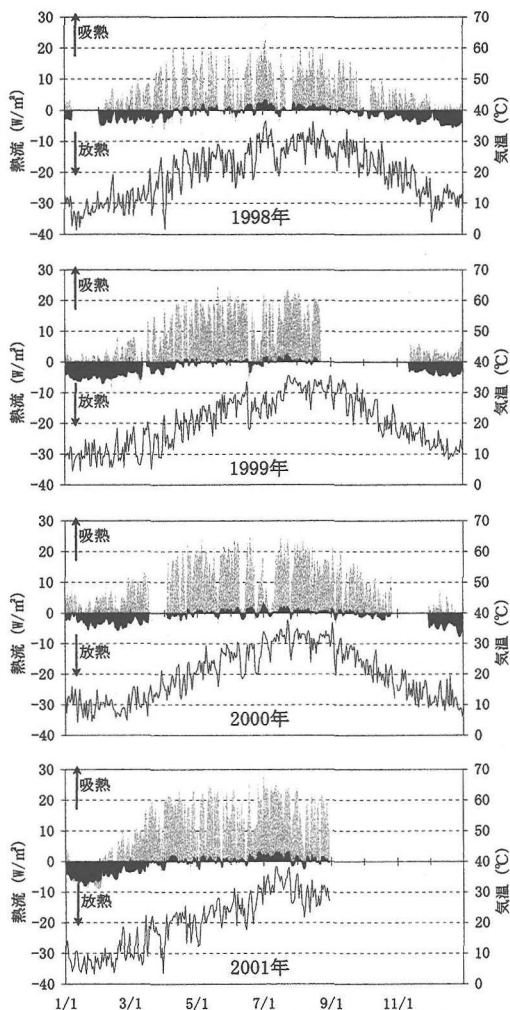


図-9 屋上面から下向きの最大熱流の年間変動
 □ 非緑化区 ■ 緑化区 — アメダス日最高気温

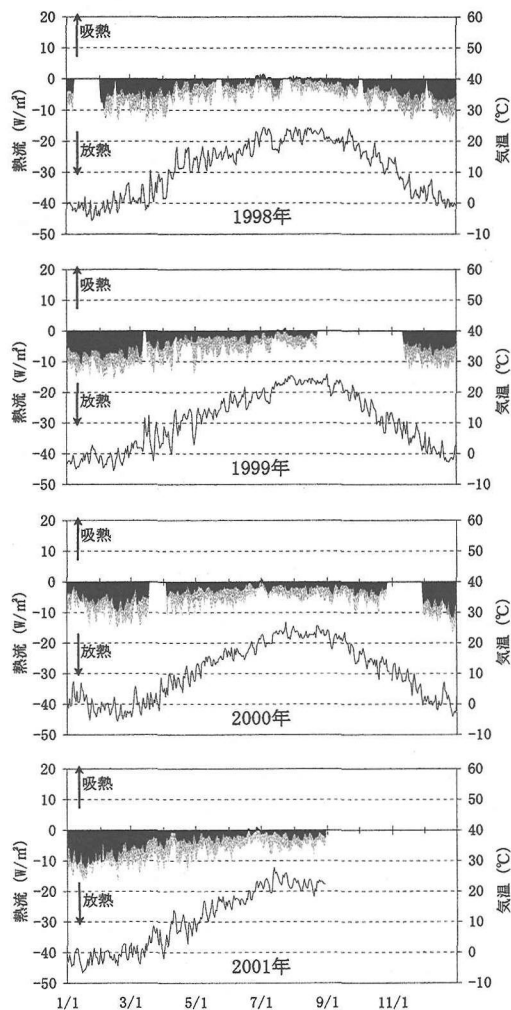


図-10 スラブ下面から上向きの最大熱流の年間変動
 □ 非緑化区 ■ 緑化区 — アメダス日最低気温

(図-6)、非緑化区で $r=0.983$ (図-7) となり、実測温度データを用いたものと同等の高い相関が見られたので、回帰式を用いて、1997年から2001年までの熱流の推定を行った。

2001年7月25日から8月8日までの期間の算定熱流(推定値)と実測熱流を比べると、その差は、緑化区で平均 $0.0\text{W}/\text{m}^2$ 、標準偏差 $0.62\text{W}/\text{m}^2$ (図-8、プラス側を屋上面から建物内への吸熱とする)、非緑化区で平均 $0.0\text{W}/\text{m}^2$ 、標準偏差 $1.33\text{W}/\text{m}^2$ であった。これらの結果および図-8からも分かるように、緑化区のスラブコンクリート下面の温度データのみを用いた推定値であっても、十分高精度に熱流の変化が

再現できることが明らかになった。

(4) 年間の最大熱流の変動

上記の温度差と熱流の解析より時間補正を行い、得られた回帰式を用いて、1998年1月から2001年8月までの30分毎の熱流の推定値を全て計算した。その結果から、屋上面から下向きの最大熱流とスラブコンクリート下面から上向きの最大熱流の年間変動を見ると、図-9、10 のようになる。なお、プラス側を屋上面から建物内への吸熱とする。図中には、最寄りのアメダス測定点における日最高気温と日最低気温の変化も記してある。また、温度データには

落雷等の影響による欠測があり、図中で空白の部分が欠測期間に相当する。

夏期の7、8月の期間について4年間を平均してみると、屋上面から建物内への吸熱量について、緑化区の下向きの最大熱流は非緑化区の最大熱流の7.3%に抑制されていた。従って、夏期の大気中から建物内へ向かう日最大熱流の低減量という指標で評価すれば、今回測定対象とした150mm厚基盤の屋上緑化を併用した場合、40mm厚発泡スチロール単独の断熱材よりも、13.7倍の断熱効果を有していると評価することが出来るだろう。

冬期については日中の断熱性よりも、夜間の最低気温時の断熱性が重要であるという視点から、建物内から大気中への放熱量を見るため、1、2月の期間について4年間を平均して上向きの最大熱流を比較した。その結果、緑化区の上向きの最大熱流は非緑化区の最大熱流の59.0%に抑制されているという結果になった。冬期の建物内から大気中へ向かう熱流の低減量という指標で評価すれば、今回測定対象とした150mm厚基盤の屋上緑化を併用した場合、40mm厚発泡スチロール単独の断熱材よりも、1.7倍の断熱効果を有していると評価することが出来るだろう。

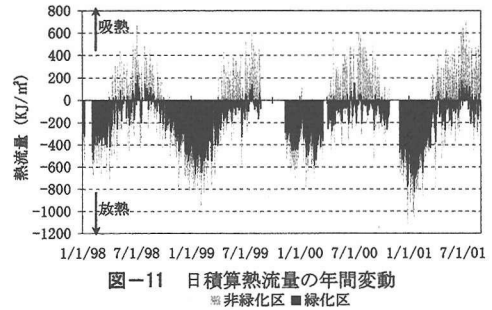
このように、夏期の大気中から建物内へ向かう熱流に対する低減効果と冬期の建物内から大気中へ向かう熱流に対する低減効果は全く異なっている。これは日中における屋上緑化の断熱効果の主たる部分、植栽基盤と植物からの蒸発散に起因しているのに対して、夜間においては、単純に植栽基盤と植物体の熱コンダクタンスだけが働いているためであると考えられる。従って、屋上緑化の断熱性能を議論する場合には、熱コンダクタンスという指標だけを議論しているのでは不十分であるということも明らかとなった。

(5) 年間の日積算熱流量の変動

次に、熱流を時間積算し、緑化区と非緑化区の日における熱流量の変動を見た。

1998年1月から2001年8月までの日積算熱流量の変動を図-11に示す。なお、プラス側を屋上面から建物内への吸熱とする。

夏期において顕著な差が見られ、4年間の7月、8月における緑化区の日積算熱流量は平均で非緑化区の日積算熱流量の18.7%にまで抑制されていた。一方、冬期においては、4年間の1月、2月における緑化区の日積算熱流量は平均で非緑化区の日積算熱流量の87.8%程度に低減されていたが、夏期ほどの大きな差は見られなかった。熱流の検討結果と



同様、冬期の保温効果より夏期の断熱効果が大きく現れるという結果になった。

4. 総合考察

以上の結果を過去の研究事例と比較してみる。

原菌らによると²⁾、トマトを用いて緑化した屋上面において、屋上スラブ面への貫流熱流量は最大で非緑化部分の貫流熱流量の30%程度に軽減されたと報告されている。また、野島らによる、商業ビルの屋上緑化事例を対象とした屋上面での貫流熱流量の報告によると³⁾、緑化部分の建築物内部への貫流熱流量は最大で非緑化部分の貫流熱流量の6.6%に軽減されたとなっている。これらは、土の存在、植物の成長状況などの違いにより、差が生じたと考えられるが、本研究結果での最大熱流の7.3%の軽減効果というのは、より条件の近い野島らの結果と³⁾、大きな違いは無いと考えていいだろう。

また、福田らによると⁷⁾、屋上緑化が集合住宅屋上の年間熱負荷に与える影響を住宅用熱負荷計算プログラムのSMASHを用いてシミュレーションした報告では、屋上緑化有は、屋上緑化無に比べて9.4%削減されるとされている。なお、このシミュレーションでは植物による日射遮蔽効果及び蒸発潜熱は考慮されていない。本研究対象の芝生による屋上緑化の年間熱負荷は、年積算熱量から比較してみると、緑化区は非緑化区よりも67.4%削減されるという結果になった。季節別に見ると、冬期では削減率は19.5~23.5%と小さいが、夏期では63.1~97.8%と非常に大きな削減率となった。これは福田ら⁷⁾が省略した蒸発潜熱の影響が大きいことを示す結果であると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた算定熱流は、本実験地の実測温度結果と実測熱流結果を用いて回帰分析を行い、回帰式より算出したものである。そのため、本研究の結果は、対象とした建物のみには適用できるものであり、一般化された数値ではない。本研究対象である都市公団建築物の断熱材は発泡スチロール相当の熱抵抗を有する厚さ 40mm の断熱材が外断熱材として使用されているが、屋上緑化を併用することにより建築物に対する熱負荷を大きく軽減することができ、屋上緑化が外断熱材として優れた効果を発揮することが明らかとなった。また、1998 年から 2000 年までの熱流の変動についても、2001 年と同様の変動傾向が見られた。つまり、屋上緑化が安定的に効果を示すことが確認され、屋上緑化による建築物への熱負荷の軽減効果を定量化することが出来た。

都市公団における 150mm 厚の薄層改良土壌と芝を用いた緑化は、レキとセダム類を用いた薄層基盤緑化と共に、屋上緑化の施工に要求される軽量化と低管理化を兼ね備えており、現在最も注目されている緑化手法のひとつであり、今後、広く普及することが予想される。今回の実験設定では、既存の外断熱材の上に緑化を行う形で測定・解析を行ったが、今後は既存の外断熱材を外して屋上緑化単独で建物を

覆った場合の熱環境の解析等も行い、屋上緑化を建築外断熱材として用いる場合の、最も適切な屋上の断面構成を追及していく必要があると考える。

参考文献

- 1) (財)都市緑化技術開発機構：新・緑化空間デザインの普及マニュアル，誠文堂新光社，1995
- 2) 原菌芳信，池田英男：屋上での簡易溶液栽培による室内熱環境への影響，農業気象 46(1)，pp. 9-17，1990
- 3) 野島義照ほか：屋上緑化による夏期の建築物および都市の熱負荷の軽減効果の実証的研究，日本緑化工学会誌 20(3)，pp. 168-176，1995
- 4) 田中順一：都市公団における薄層土壌による屋上緑化技術，造園技術報告集 1，pp. 70~73，2001
- 5) C. S. B. Grimmond et al. : AN OBJECTIVE URBAN HAET STORAGE MODEL AND ITS COMPARISON WITH OTHER SCHMES, Atmospheric Environment Vol. 25, No. 3, pp. 331-326, 1991
- 6) Dario Camuffo, Adriana Bernardi : AN OBSERVATIONAL STUDY OF HEAT FLUXES AND THEIR RELATIONSHIPS WITH NET RADIATION, Boundary-layer Meteorology, Vol. 23, pp. 359-368, 1982
- 7) 福田淳ほか：屋上緑化が集合住宅最上階に与える熱的影響，日本緑化工学会誌 27(1)，pp. 209-210，2001

PRACTICAL STUDY ON THE REDUCTION EFFECT OF THE HEAT ABSORPTION OF THE BUILDING BY THE ROOF TOP PLANTINGS

The surface temperature measurement and the soil temperature measurement and the heat flux measurement were done in order to be quantified the effect of the heat absorption of the building by the roof top plantings. The strong correlation was observed between the differences of temperature of a slab vertical side and the heat flux. When the heat flux for four years were averaged about the period in July and August of a summer, at the vegetation section, the heat flux decreased by 7.3% of that at the non-vegetation section at the upward maximum. When the heat flux for four years were averaged about the period in January and February of a winter, at the vegetation section, the heat flux decreased by 59.0% of that at the non-vegetation section at the downward maximum.